

ПРИМЕНЕНИЕ КОВАРИАЦИОННОГО АНАЛИЗА И АДАПТИВНЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРАТЕГИЙ ЦИРКУЛЯРНОЙ ЭКОНОМИКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ КОРПОРАЦИЙ *

DOI: <https://doi.org/10.24891/dzcmsz>EDN: <https://elibrary.ru/dzcmsz>

Александр Александрович ШАПУРОВ

доктор экономических наук, профессор кафедры прикладной математики и информационных технологий имени профессора В.М. Найдыша, Мелитопольский государственный университет (МелГУ), Мелитополь, Запорожская область, Российская Федерация

e-mail: shapurov.alexandr@gmail.com

ORCID: отсутствует

SPIN: 9454-2401

История статьи:

Reg. № 1/2026

Получена 12.01.2026

Одобрена 16.02.2026

Доступна онлайн

30.03.2026

Специальность: 5.2.3

УДК

519.86:004.9:504.06

JEL: C12, C53, L61,

Q53

Ключевые слова:

циркулярная экономика, металлургическая промышленность, эконометрическое моделирование, адаптивное прогнозирование, оценка жизненного цикла

Аннотация

Предмет. Процессы трансформации управленческих моделей металлургических предприятий в условиях глобального климатического регулирования и цифровизации.

Цели. Разработка и апробация интегрированного информационно-аналитического инструментария для оценки влияния стратегий циркулярной экономики на финансовую и экологическую результативность корпораций.

Методология. Исследование базируется на комплементарном подходе, синтезирующем методы математической статистики и системного анализа. Применен ковариационный анализ с использованием фиктивных переменных для количественной оценки влияния технологических факторов на прибыльность. Использована адаптивная модель двойного экспоненциального сглаживания Брауна для прогнозирования динамики производственных показателей и модель оценки жизненного цикла в специализированной программной среде для верификации экологических рисков.

Результаты. Установлено, что полная переработка побочных продуктов металлургического передела является статистически значимым драйвером роста чистой прибыли. Выявлен устойчивый тренд увеличения объемов производства, который при инерционном сценарии ведет к критическому росту экотоксичности. Рассчитан потенциал рынка вторичного сырья и сформирована матрица стратегического развития, позволяющая менеджменту определять оптимальные траектории технологической модернизации.

Выводы. Интеграция математического моделирования и экологической оценки позволяет обосновать экономическую целесообразность перехода от линейной модели к замкнутому циклу, трансформируя техногенные отходы из пассивов в ликвидные активы и обеспечивая финансовую устойчивость бизнеса.

© Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ, 2026

Для цитирования: Шапуров А.А. Применение ковариационного анализа и адаптивных методов прогнозирования для оценки стратегий циркулярной экономики металлургических корпораций // Экономический анализ: теория и практика. – 2026. – № 3. – С. 39 – 56. DOI: 10.24891/dzcmsz
EDN: DZCMSZ

Усиление глобального климатического регулирования, закрепленное в Парижском соглашении и стратегии European Green Deal, наряду с Повесткой дня в области устойчивого развития на период до 2030 г., детерминирует необходимость смены промышленной парадигмы [1–3]. Для ресурсоемкой сталелитейной промышленности императивом становится переход от линейной модели (take-make-dispose) к циркулярной экономике, что имеет высокую корреляцию с целями устойчивого развития [4–6]. В современных условиях утилизация техногенных отходов и побочных продуктов металлургического передела трансформируется из экологического обременения в драйвер финансового роста и конкурентного преимущества¹ [7]. Однако несмотря на экспоненциальный рост интереса к теме, существующий научный дискурс остается фрагментарным. Большинство исследований фокусируются либо на изолированных аспектах управления цепями поставок [8], либо на сугубо технологических вопросах энергоэффективности [9], оставляя за скобками комплексную оценку влияния циркулярной экономики на корпоративные финансы. Наблюдается дефицит системных методологий, которые объединяли бы финансовый анализ с экологической оценкой жизненного цикла (LCA) и макроэкономическим прогнозированием. Данное исследование призвано заполнить этот пробел, предлагая комплементарный подход к оценке микро- (финансовые показатели) и макроэкономических (рыночная динамика, экология) эффектов циркулярной экономики в металлургии.

Целью исследования является разработка и апробация интегрированной модели оценки влияния циркулярной экономики на результативность металлургических предприятий. Для достижения цели поставлены следующие задачи: количественная оценка влияния факторов циркулярной экономики на финансовые показатели (ANCOVA); прогнозирование емкости рынка побочных продуктов; оценка экологического воздействия (LCA).

Методологический дизайн исследования базируется на комплементарном подходе, интегрирующем наукометрический анализ, эконометрическое моделирование и экологическую оценку жизненного цикла для формирования целостной стратегии управления ресурсами в металлургии (рис. 1).

На первоначальном этапе для верификации актуальности проблематики был проведен анализ библиометрических данных базы Scopus (инструмент SciVal) за 2021–2025 гг. Выборка из 19 417 публикаций подтвердила экспоненциальный рост интереса к циркулярной экономике, одновременно выявив существенный пробел в исследованиях, связывающих технологические аспекты рециклинга с финансовыми результатами корпораций [10]. Тематический анализ ключевых слов демонстрирует доминирование инженерных и экологических терминов (рис. 2). При этом динамика публикаций по финансовым аспектам существенно отстает от общего тренда (рис. 3).

Формирование эмпирической базы осуществлялось на основе триангуляции данных. Во-первых, были агрегированы временные ряды производственной статистики World Steel Association² о динамике выплавки стали за 2005–2024 гг., что позволило выявить устойчивый тренд роста отрасли. Во-вторых, проведен контент-анализ отчетов об устойчивом развитии топ-10 глобальных металлургических корпораций (Metinvest, ArcelorMittal, Nippon Steel и др.), что позволило систематизировать подходы к реализации принципов циркулярной экономики (табл. 1).

* Автор выражает благодарность и глубокую признательность доктору технических наук, профессору кафедры прикладной математики и информационных технологий имени профессора В.М. Найдыша Мелитопольского государственного университета Андрею Владимировичу НАЙДЫШУ за советы и ценные замечания при работе над данной статьей.

¹ Steel and raw materials. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-raw-materials-2023-1.pdf>

² World Steel Association. URL: <https://worldsteel.org/>

Для количественной оценки влияния внедрения принципов циркулярной экономики на финансовые показатели использован ковариационный анализ (ANCOVA). Выбор данного метода обусловлен необходимостью одновременного учета непрерывных ковариат (материалоемкость) и качественных факторов. На основе данных о стратегиях корпораций (*табл. 1*) было проведено кодирование качественных состояний внедрения циркулярных практик посредством фиктивных переменных (*dummy variables*) (*табл. 2*).

В спецификации эконометрической модели зависимой переменной выступает чистая прибыль, а независимыми факторами – материалоемкость и бинарные переменные, отражающие стадии декарбонизации и глубину переработки отходов (*табл. 3*).

Это позволило оценить маржинальный эффект перехода от линейной модели к различным уровням замкнутого цикла, контролируя при этом влияние производственных издержек.

Прогнозирование макроэкономической емкости рынка побочных продуктов (шлаков, шламов, пыли) выполнено с применением адаптивной модели двойного экспоненциального сглаживания Брауна. Данный инструмент продемонстрировал наибольшую робастность для анализа временных рядов металлургического производства (*табл. 1*) по сравнению с моделями ARIMA [11, 12]. Валидация модели проводилась на основе критериев MAPE и RMSE, что обеспечило высокую точность сценарных прогнозов.

Экологическая верификация полученных экономических сценариев осуществлена методом оценки жизненного цикла (LCA) в соответствии со стандартом ISO 14040 [13]. Границы системы определены как «от колыбели до могилы». Моделирование производилось в программной среде openLCA 2.0 с использованием базы данных Worldsteel Life Cycle Inventory [14], что позволило детализировать воздействие на ключевые экологические категории: изменение климата, водную экотоксичность и землепользование.

Теоретический базис и технологические императивы трансформации. Стратегическим целеполаганием экономики замкнутого цикла (ЭЗЦ) выступает декуплинг экономического роста от ресурсопотребления, достигаемый за счет пролонгации производственных циклов и максимизации потенциала рециклинга. В отличие от линейной парадигмы ЭЗЦ постулирует необходимость минимизации энтропии и рассматривает ресурсы как активы, подлежащие длительному удержанию в хозяйственном обороте. Репрезентативным примером такой технологической трансформации в металлургии является проект CIRMET, базирующийся на модульных решениях для валоризации промышленных остатков [15].

Архитектура ЭЗЦ дифференцируется на иерархические уровни: от повторного использования до рекуперации и утилизации [14, 16].

Для металлургического сектора нами синтезирована концепция 3R + co-P (Reduction, Reuse, Recycling + co-Products). Именно этот теоретический базис лег в основу спецификации нашей эконометрической модели (ANCOVA), позволив выделить ключевые факторы влияния на финансовую результативность отрасли.

Эконометрическая оценка финансовых эффектов. Эмпирическая верификация функциональной зависимости финансовых результатов от факторов циркулярной экономики осуществлена посредством расчета параметров уравнения регрессии. Итоговая модель демонстрирует высокую объясняющую способность (*табл. 4*).

Полученные статистики подтверждают надежность модели: коэффициент детерминации $R^2 = 0,9993$ указывает на то, что вариация зависимой переменной (чистая прибыль) практически полностью детерминирована включенными в модель факторами. Критерий Фишера ($F = 1201,39$; $p < 0,001$) свидетельствует о статистической значимости уравнения в целом. Диагностические тесты на линейность (тест Рамсея: $F = 0,36$; $p = 0,829$) и нормальность

распределения остатков (тест Шапиро – Уилка: $p = 0,637$) подтвердили выполнение условий Гаусса – Маркова, что позволяет использовать полученные коэффициенты для сценарного прогнозирования [17, 18].

Анализ коэффициентов регрессии выявил, что наибольший вклад в формирование прибыли вносит полная переработка побочных продуктов (коэффициент $\beta = 9,16$). Это подтверждает гипотезу о том, что в условиях Индустрии 4.0 отходы становятся ключевым активом.

На основе полученной модели проведен сценарный анализ для корпорации «Метинвест» (табл. 5).

Результаты показывают, что инерционный сценарий (сохранение текущей бизнес-модели) генерирует убыток в размере 5,22 млрд долл. В то же время комплексная трансформация, включающая развитую декарбонизацию и полную переработку отходов, позволяет выйти на прибыль 6,17 млрд долл.

Технологическим базисом для такого перехода служат модульные решения, позволяющие интегрировать процессы рециклинга непосредственно в производственный цикл, как показано на примере проекта CIRMET (рис. 4).

Прогнозирование рыночной конъюнктуры и экологических нагрузок. Для оценки масштабируемости полученных финансовых результатов был выполнен прогноз динамики производства стали с использованием модели Брауна. Расчеты выявили устойчивый линейный тренд роста ($y = 88,5t + 883,67$), что позволяет прогнозировать объем производства на уровне 2 231 тыс. т в следующем периоде (табл. 6).

Ошибка прогноза определяется по формуле

$$s = \sqrt{\frac{\sum (y_t - \hat{y}_t)^2}{n - 2}} = \sqrt{\frac{808\,506,541}{20 - 2}} = 211,936.$$

Определим значение критерия Стьюдента для числа степеней свободы:

$$k = n - m = 20 - 2 = 18 \text{ и уровня значимости } 0,05 : t(18; 0,05) = 2,101.$$

$$\text{Нижняя граница прогноза: } y_1 = 2\,231,08 - 211,936 = 1\,785,802.$$

$$\text{Верхняя граница прогноза: } y_2 = 2\,231,08 + 211,936 = 2\,676,358.$$

Высокая точность прогноза подтверждается показателями ошибки (MAPE = 1,36%; RMSE = 28,28 тыс. т). Рост производства неизбежно сопряжен с увеличением экологической нагрузки. Интеграция прогнозных объемов в систему оценки жизненного цикла (OpenLCA) позволила квантифицировать эти риски (табл. 7).

Критические значения выявлены в категориях «Водная экотоксичность» ($-2,26281e+8$ item); «Изменение климата» ($-1,22161e+8$ kg). Эти данные указывают на то, что финансовый успех, прогнозируемый в модели ANCOVA, может быть нивелирован экологическими штрафами без внедрения компенсационных механизмов [19].

Однако анализ материальных потоков через призму концепции ELFM (Extraction of Valuable Materials from Landfills) позволяет переосмыслить данные LCA как оценку ресурсного потенциала. Расчет сегментов рынка (табл. 8) демонстрирует, что прогнозируемый рост производства сформирует значительный рынок вторичного сырья.

Наиболее емкими сегментами являются шлам ($4,06 \cdot 10^4$ кг); хвосты ($5,81 \cdot 10^6$ кг); отходы, размещенные на хранение ($3,19 \cdot 10^8$ кг); углекислый газ ($8,48 \cdot 10^2$ кг). Утилизация данных

объемов представляет собой не только экологическую необходимость, но и источник дополнительной монетизации, не учтенный в традиционных финансовых моделях [20].

Синтез результатов ANCOVA, модели Брауна и LCA позволил сформировать Матрицу стратегического развития металлургической корпорации (рис. 5). Данный инструмент связывает темпы роста производства (ось Y) с этапами внедрения циркулярной экономики и финансовыми результатами (ось X).

Ключевые стратегические зоны матрицы:

- зона высокого риска – высокий темп роста производства при отсутствии практик циркулярной экономики (начальная декарбонизация) ведет к максимизации убытков и экологического ущерба. Стратегия: немедленный переход к переработке для снижения убытков;
- зона умеренной эффективности – частичная переработка позволяет генерировать умеренную прибыль, достаточную для реинвестирования в экологические технологии (улавливание углерода);
- зона лидерства – полная переработка побочных продуктов обеспечивает высокую прибыльность, однако высокий валовой объем производства требует внедрения прорывных технологий (водородная металлургия) для компенсации абсолютного роста эмиссии.

В отличие от одномерных подходов, предлагаемая матрица позволяет менеджменту выбирать траекторию развития, балансируя между финансовой стабильностью и экологической ответственностью, избегая «ловушки роста», когда увеличение производства ведет к непропорциональному росту экологических штрафов и издержек.

Данная конфигурация локализует корпорацию «Метинвест» в квадранте «зона риска», характеризующемся генерацией операционных убытков (расчетное значение –5,22 млрд долл.) и критической экологической уязвимостью перед регуляторными вызовами. Согласно результатам моделирования, стратегическим императивом выхода из кризисной траектории для предприятия выступает горизонтальный дрейф в «зону лидерства» посредством реализации сценария полной переработки побочных продуктов, что позволит конвертировать техногенные отходы в ликвидные активы и сменить вектор финансового результата на положительный (прогнозная прибыль – 6,17 млрд долл.), тем самым компенсируя капитальные затраты на декарбонизацию за счет доходов от промышленного симбиоза.

В ходе исследования подтверждена высокая эвристическая ценность комплементарного методологического подхода, объединяющего наукометрический анализ, эконометрическое моделирование (ANCOVA), адаптивное прогнозирование (модель Брауна) и оценку жизненного цикла (LCA). Данный синтез позволил преодолеть фрагментарность существующего научного дискурса, связав технологические параметры рециклинга с финансовой результативностью металлургических корпораций.

Результаты ковариационного анализа (ANCOVA) статистически доказали, что переход к экономике замкнутого цикла является не столько имиджевым инструментом ESG, сколько фундаментальным фактором финансовой устойчивости. Установлено, что наибольший маржинальный вклад в формирование чистой прибыли вносит полная переработка побочных продуктов. Это опровергает гипотезу о том, что экологические инвестиции являются исключительно затратной частью и подтверждает возможность монетизации техногенных отходов в условиях Индустрии 4.0.

Апробация модели двойного экспоненциального сглаживания Брауна выявила устойчивый линейный тренд роста производства стали, что при инерционном сценарии неизбежно

ведет к усилению экологической нагрузки, подтвержденной данными LCA. Однако переосмысление полученных объемов через концепцию ELFM (Extraction of Valuable Materials from Landfills) позволяет идентифицировать значительный ресурсный потенциал: прогнозируемые объемы шламов и хвостов трансформируются из экологического пассива в ликвидную сырьевую базу для смежных отраслей (строительство, химическая промышленность).

Разработанная матрица стратегического развития позволила верифицировать текущее положение корпорации «Метинвест» в квадранте «зона риска», характеризующемся генерацией убытков (-5,22 млрд долл.) при высокой материалоемкости. Сценарное моделирование доказало безальтернативность перехода в «зону лидерства» через внедрение полной переработки побочных продуктов. Реализация данной стратегии способна обеспечить качественный скачок финансового результата до +6,17 млрд долл., позволяя компенсировать капитальные затраты на декарбонизацию за счет доходов от промышленного симбиоза и нивелировать риски потери конкурентоспособности на глобальном рынке.

Таблица 1

Уровень внедрения циркулярной экономики в деятельность металлургического сектора

Table 1

The level of implementation of circular economy in the metallurgical sector

Корпорация	Повторное использование (Reuse) / декарбонизация	Переработка (Recycle) / лом	Побочные продукты (Co-products)
Metinvest	Углеродная нейтральность к 2050 г.; по состоянию на 2023 г. декарбонизация не начата. Вывод: отсутствует	100%-ная переработка внутреннего стального лома. Вывод: полная переработка	Нет переработки сопутствующей продукции, продажа шлака и пыли. Вывод: отсутствует
Interpipe	Отсутствие декарбонизации и производства зеленой стали. Вывод: отсутствует	100%-ная переработка внутреннего стального лома. Вывод: полная переработка	Частичная переработка шлака, продажа другой сопутствующей продукции. Вывод: частичная переработка
Erdemir Group	Углеродная нейтральность к 2050 г. Вывод: начальная стадия	100%-ная переработка внутреннего стального лома. Вывод: полная переработка	Недоступность переработки сопутствующей продукции, продажа шлака. Вывод: частичная переработка
Nippon Steel	Углеродная нейтральность к 2050 г. Сокращение выбросов CO ₂ на 15,2 млн т. Вывод: стадия развития	100%-ная переработка бытового, промышленного и амортизационного стального лома. Вывод: полная переработка	100%-ная переработка побочных продуктов: 0% выбросов стальной пыли, полная переработка шлака на оборудовании RHF. Вывод: полная переработка
POSCO Holdings	Сокращение выбросов CO ₂ на 30% к 2030 г. и 0% выбросов углерода к 2050 г. Вывод: начальная стадия	Переработка стального лома до 500 000 т (до 2025 г.), инвестиции в проект 20 млрд вон. Вывод: полная переработка	Использование стального шлака для создания «морского леса», для производства удобрений. Вывод: частичная переработка
ArcelorMittal	Сокращение выбросов CO ₂ на 35% к 2030 г. и достижение углеродной нейтральности к 2050 г.	100%-ная переработка внутреннего стального лома (1 млн т/год). Вывод: полная переработка	Продажа 200 000 т шлака в год строительной отрасли. Вывод: частичная переработка

Корпорация	Повторное использование (Reuse) / декарбонизация	Переработка (Recycle) / лом	Побочные продукты (Co-products)
	Вывод: начальная стадия		ботка
China Baowu Steel Group	Сокращение выбросов CO ₂ на 35% к 2030 г. и достижение углеродной нейтральности к 2050 г. Вывод: Начальная стадия	100%-ная переработка бытового, промышленного и амортизационного стального лома (2 млн т/год, общие инвестиции в переработку лома 68,3 млн долл.). Вывод: полная переработка	Зеленое, безотходное производство, очистка промышленных сточных вод 1 тыс. т/сутки. Вывод: полная переработка
Emirates Steel	Снижение интенсивности выбросов углерода на 50% к 2030 г. 0% выбросов углерода к 2050 г. Вывод: стадия развития	100%-ная переработка внутреннего стального лома. Вывод: полная переработка	Частичная переработка или продажа. Вывод: частичная переработка
Steel Dynamics	Снижение интенсивности выбросов углерода на 20% к 2025 г. Вывод: начальная стадия	100%-ная переработка внутреннего стального лома. 12 млн т переработанного лома в 2021 г. Вывод: полная переработка	Частичная переработка сопутствующей продукции. Вывод: частичная переработка
Tata Steel	Сокращение выбросов CO ₂ до 2 т / 1 т стали к 2025 г. Вывод: начальная стадия	100%-ная переработка внутреннего стального лома. Вывод: полная переработка	100% переработка сопутствующей продукции. Вывод: частичная переработка

Источник: World Steel Association. URL: <https://worldsteel.org/>; LeadIT.

URL: <https://www.industrytransition.org/>; TPI Centre. URL: <https://www.transitionpathwayinitiative.org/>; Investing.com. URL: <https://www.investing.com/>

Source: World Steel Association. URL: <https://worldsteel.org/>; LeadIT.

URL: <https://www.industrytransition.org/>; TPI Centre. URL: <https://www.transitionpathwayinitiative.org/>; Investing.com. URL: <https://www.investing.com/>

Таблица 2

Кодирование качественных переменных

Table 2

Encoding of qualitative variables

Корпорации	Декарбонизация или зеленая сталь	Стадия развития	Начальная стадия	Переработка сопутствующей продукции	Полная переработка	Частичная переработка
Metinvest	Отсутствует	0	0	Отсутствует	0	0
Interpipe	Отсутствует	0	0	Частичная	0	1
Erdemir Group	Начальная стадия	0	1	Частичная	0	1
Nippon Steel	Стадия развития	1	0	Полная	1	0
POSCO Holdings	Начальная стадия	0	1	Частичная	0	1
ArcelorMittal	Начальная стадия	0	1	Частичная	0	1
China Baowu Steel Group	Начальная стадия	0	1	Полная	1	0
Emirates Steel	Стадия развития	1	0	Частичная	0	1
Steel Dynamics	Начальная стадия	0	1	Частичная	0	1
Tata Steel	Начальная стадия	0	1	Частичная	0	1

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Таблица 3**Спецификация функциональной эконометрической модели зависимости финансовых результатов металлургических предприятий****Table 3****Specification of the functional econometric model of dependence of financial results of metallurgical enterprises**

Корпорация	Чистая прибыль, млрд долл.	Материалоемкость, тыс. долл./т	Стадия развития	Начальная стадия	Полная переработка	Частичная переработка
Metinvest	-2,193	2,86	0	1	0	0
Interpipe	0,204	1,06	0	0	0	1
Erdemir Group	0,657	0,578	0	1	0	1
Nippon Steel	4,908	1,08	1	0	1	0
POSCO Holdings	0,382	0,381	0	1	0	1
ArcelorMittal	0,261	0,228	0	1	0	1
China Baowu Steel Group	5,293	0,741	0	1	1	0
Emirates Steel	0,138	0,757	1	0	0	1
Steel Dynamics	0,634	0,417	0	1	0	1
Tata Steel	4,944	0,2	0	1	1	0

Источник: авторская разработка*Source:* Authoring**Таблица 4****Функциональная эконометрическая модель финансовых результатов металлургических предприятий****Table 4****Functional econometric model of financial results of metallurgical enterprises**

Переменная (коэффициент)	Значение	Показатель качества модели	Значение
Y-пересечение (константа)	-5,2203	F-статистика	1 201,3993
Материалоемкость	0,7792	Значимость F (p-value)	1,9·10 ⁻⁶
Декарбонизация (развитие)	0,1474	Степени свободы (df)	5
Декарбонизация (начальная)	0,7987	Множественный R	0,9996
Переработка побочных (полная)	9,1621	R ²	0,9993
Переработка побочных (частичная)	4,5983	-	-

Источник: авторская разработка*Source:* Authoring

Таблица 5

Прогноз финансового результата на основе модели с фиктивными переменными (корпорация «Метинвест»), млрд долл. США

Table 5

Forecast of financial result based on a model with fictitious variables (Metinvest Corporation), billion USD

Сценарий	Результат
Без внедрения инновационных изменений	-5,2203
Результат снижения материалоемкости без качественных компонентов	-2,9917
Результат декарбонизации, начальная стадия	-2,19
Результат декарбонизации, стадия развития	-2,8443
Результат частичной переработки побочных продуктов и декарбонизации, стадия развития	2,4083
Результат полной переработки побочных продуктов, декарбонизации, стадия развития	6,1704

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Таблица 6

Вспомогательная таблица для расчета прогнозного показателя по модели Брауна

Table 6

Auxiliary table for calculating the forecast indicator according to the Brown model

i	y_i	Сглаживание данных a_i	Сглаживание тренда b_i	Прогноз y_i^*	$(y_i - y_i^*)^2$
1	971	1 060,667	88,5	1 060,667	8 040,111
2	1 063	1 140,964	87,719	1 149,167	7 424,694
3	1 148	1 221,002	86,988	1 228,683	6 509,693
4	1 250	1 302,469	86,462	1 307,99	3 362,784
...
19	1 962	2 145,869	59,296	2 165,216	41 296,548
20	1 885	2 174,686	56,394	2 205,165	102 505,81

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Таблица 7

Данные инвентаризации оценки жизненного цикла для стального холоднокатаного рулона

Table 7

Life cycle assessment inventory data for Cold rolled steel

Показатель (индикатор)	Сталь холоднокатаная в рулонах (Global 2020)	Единица измерения
Истощение абиотических ресурсов (Abiotic resource depletion)	-3,49350e+2	кг
Защеление (Acidification)	-5,54452e+4	моль
Водная экотоксичность (Aquatic eco-toxicity)	-2,26281e+8	ед. (item)
Эвтрофикация водоемов (Aquatic Eutrophication)	-6,83524e+4	кг
Канцерогенное воздействие на здоровье человека (Cancer human health effects)	-1,73367e-12	ед. (item)
Изменение климата (Climate change)	-1,22161e+8	кг
Ионизирующее излучение (Ionizing radiation)	-1,02574e+6	кБк (kBq)
Землепользование (Land use)	-2,19191e+8	ед. (item)

Показатель (индикатор)	Сталь холоднокатаная в рулонах (Global 2020)	Единица измерения
Неканцерогенное воздействие на здоровье человека (Non-cancer human health effects)	-3,05004e-1	ед. (item)
Другое (other)	-2,84398e+8	м ³
Истощение озонового слоя (Ozone depletion)	-5,55552e-7	кг
Образование фотохимического озона (Photochemical ozone creation)	-2,31107e+5	кг
Неорганические вещества, воздействующие на дыхательные пути (Respiratory inorganics)	-2,82951e+0	ед. (item)
Наземная эвтрофикация (Terrestrial Eutrophication)	-2,42566e+5	моль

Примечание. Использован программный комплекс openLCA 2.0.

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Таблица 8

Сегменты рынка, рассчитанные с использованием модели жизненного цикла продукции

Table 8

Market segments calculated using the product lifecycle model

Выходы (Outputs)	Количество (на 1 кг (сталь холоднокатаная в рулонах))	Сегменты мирового рынка стали	Единица измерения
Производство материалов			
Карбонилсульфид	3,78E-20	8,43E-11	кг
Гипс	9,03E-17	2,01E-07	кг
Раствор сульфата железа	1,21E-16	2,70E-07	кг
Вода (опресненная; деионизированная)	4,04E-25	9,01E-16	кг
Отходы			
Шлам от обработки эмульсии холодной прокатки	1,82E-05	4,06E+04	кг
Опасные отходы (размещенные/депонированные)	1,49E-08	3,33E+01	кг
Опасные отходы (подземное захоронение)	6,42E-17	1,43E-07	кг
Высокоактивные радиоактивные отходы	6,03E-10	1,35E+00	кг
Низкоактивные радиоактивные отходы	1,11E-08	2,47E+01	кг
Среднеактивные радиоактивные отходы	5,31E-09	1,18E+01	кг
Вскрышная порода (размещенная)	0,002602	5,81E+06	кг
Бумага (неспецифицированная)	6,03E-21	1,35E-11	кг
Радиоактивные хвосты	5,67E-07	1,26E+03	кг
Шлак (размещенный)	4,01E-12	8,95E-03	кг
Хвосты обогащения (размещенные)	0,247023	5,51E+08	кг
Отходы (размещенные)	0,142926	3,19E+08	кг
Выбросы в нижнюю стратосферу и верхнюю тропосферу			
Диоксид углерода (ископаемый)	3,80E-07	8,48E+02	кг
Метилборат	3,82E-23	8,52E-14	кг
Благородные газы, радиоактивные, неспецифицированные	3,15E-29	7,03E-20	кБк
Выбросы в городской воздух (приземный слой)			
Бензальхлорид	2,44E-27	5,44E-18	кг
Триметилхлорсилан	1,69E-24	3,77E-15	кг

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Рисунок 1
Интеграция методов и подходов к исследованию
Figure 1
Integration of methods and approaches to research



Источник: авторская разработка
 Source: Authoring

Рисунок 2
Циркулярная экономика: 50 ключевых фраз

Figure 2
Circular economy: 50 key phrases

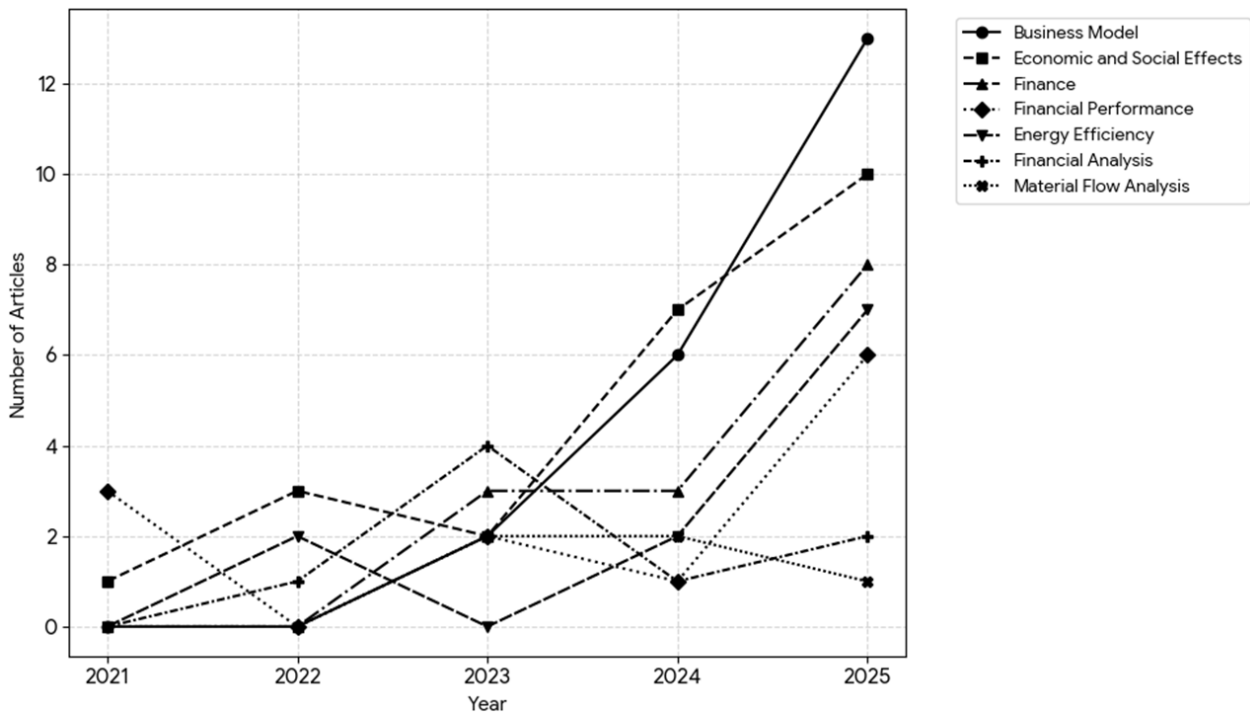


Примечание. Использован инструмент библиометрического анализа SciVal.
Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Рисунок 3
Динамика публикаций с ключевыми вопросами анализируемого кластера (финансовых результатов циркулярной экономики)

Figure 3
Changes in publications with key issues of the analyzed cluster (financial results of circular economy)



Примечание. Использован инструмент библиометрического анализа SciVal.
Источник: авторская разработка

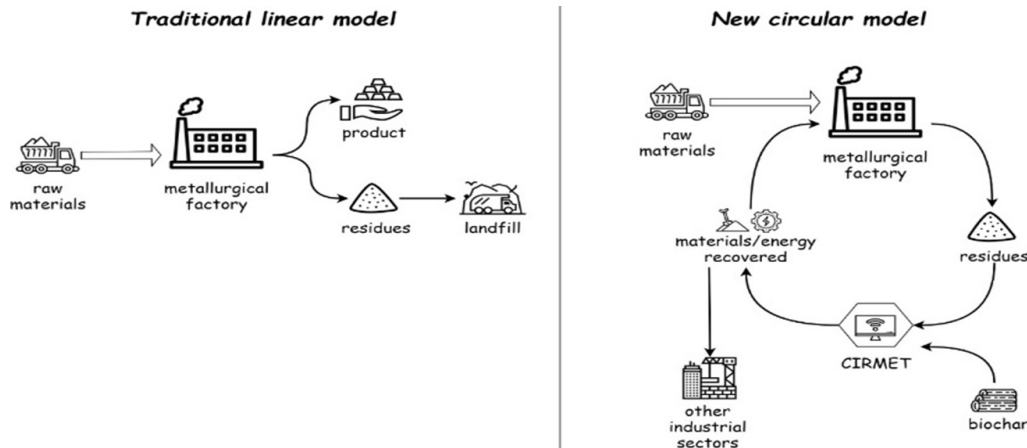
Source: Authoring

Рисунок 4

Научно-практический пример перехода от линейной к циркулярной модели в металлургическом секторе

Figure 4

A scientific and practical example of the transition from a linear model to a circular one in the metallurgical sector



Источник: [10]

Source: [10]

Рисунок 5

Матрица стратегического развития металлургической корпорации

Figure 5

The matrix of strategic development of the metallurgical corporation

Темп роста производства / экослед	Начальная стадия (убытки / декарбонизация)	Частичная переработка (умеренная прибыль)	Полная переработка (высокая прибыль)
Высокий (> 4%) (критический экослед)	Зона риска <i>Стратегия:</i> экстренное торможение роста или форсированный переход к рециклингу. <i>Цель:</i> избежание банкротства от экологических штрафов	Зона экспансии <i>Стратегия:</i> агрессивное расширение рынков сбыта побочных продуктов (шлак, газы). <i>Цель:</i> финансирование технологий улавливания углерода	Зона лидерства <i>Стратегия:</i> внедрение Deep Tech (водородная металлургия, промышленный симбиоз). <i>Цель:</i> минимизация абсолютного воздействия при росте объемов
Средний (2–4%) (умеренный экослед)	Зона оптимизации <i>Стратегия:</i> Cost-cutting и энергоэффективность. <i>Цель:</i> снижение операционных убытков	Зона диверсификации <i>Стратегия:</i> перепрофилирование отходов и рециркуляция газов. <i>Цель:</i> повышение рентабельности активов	Зона устойчивости <i>Стратегия:</i> масштабирование замкнутых циклов. <i>Цель:</i> поддержка «зеленого» имиджа и ESG-рейтингов
Низкий (0–2%) (низкий экослед)	Зона выживания <i>Стратегия:</i> минимальный рециклинг лома. <i>Цель:</i> сохранение финансовой стабильности	Зона накопления <i>Стратегия:</i> постепенное внедрение технологий переработки. <i>Цель:</i> наращивание инвестиционного капитала	Зона инноваций <i>Стратегия:</i> реинвестирование сверхприбыли в НИОКР. <i>Цель:</i> технологическая подготовка к будущему росту

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Список литературы

1. Mendez-Alva F., Cervo H., Krese G., Van Eetvelde G. Industrial symbiosis profiles in energy-intensive industries: Sectoral insights from open databases. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 314, no. 128031. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128031
2. Silvestre B.S., Țîrcă D.M. Innovations for sustainable development: Moving toward a sustainable future. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 208, pp. 325–332. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.244
3. Hidayatno A., Destyanto A.R., Hulu C.A. Industry 4.0 Technology Implementation Impact to Industrial Sustainable Energy in Indonesia: A Model Conceptualization. *Energy Procedia*, 2019, vol. 156, pp. 227–233. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.11.133
4. Schroeder P., Anggraeni K., Weber U. The relevance of circular economy practices to the sustainable development goals. *Journal of Industrial Ecology*, 2018, vol. 23, iss. 1, pp. 77–95. DOI: 10.1111/jiec.12732
5. Ormazabal M., Prieto-Sandoval V., Puga-Leal R., Jaca C. Circular economy in Spanish SMEs: challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 185, pp. 157–167. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.031
6. Shu-hua Ma, Zong-guo Wen, Ji-ning Chen, Zhi-chao Wen. Mode of circular economy in China's iron and steel industry: a case study in Wu'an city. *Journal of Cleaner Production*, 2014, vol. 64, pp. 505–512. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.10.008
7. Fox M.A. Metallurgical By-Products. In: Glossary for the Worldwide Transportation of Dangerous Goods and Hazardous Materials. Berlin, Heidelberg, Springer, 1999, pp. 147–150. DOI: 10.1007/978-3-662-11890-0_48
8. Belodedenko V., Hanush O., Hrechanyi O. Fatigue lifetime model under a complex loading with application of the amalgamating safety indices rule. *Procedia Structural Integrity*, 2022, vol. 36, pp. 182–189. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.01.022
9. Antrekowitsch J., Hanke G. Efficient Steel Mill Dust Recycling – Aiming for Zero Waste. In: The Minerals, Metals & Materials Series. Cham, Springer International Publishing, 2022, pp. 303–310. DOI: 10.1007/978-3-030-92563-5_32
10. Di Maria A., Merchán M., Marchand M. et al. Evaluating energy and resource efficiency for recovery of metallurgical residues using environmental and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2022, no. 131790. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131790
11. Smyl S. A hybrid method of exponential smoothing and recurrent neural networks for time series forecasting. *International Journal of Forecasting*, 2020, vol. 36, iss. 1, pp. 75–85. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2019.03.017
12. Min Liu, Taylor J.W., Wei-Chong Choo. Further empirical evidence on the forecasting of volatility with smooth transition exponential smoothing. *Economic Modelling*, 2020, vol. 93, pp. 651–659. DOI: 10.1016/j.econmod.2020.02.021
13. Rendon-Sanchez J.F., de Menezes L.M. Structural combination of seasonal exponential smoothing forecasts applied to load forecasting. *European Journal of Operational Research*, 2019, vol. 275, iss. 3, pp. 916–924. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.12.013
14. Paravantis J.A., Tasios P.D., Dourmas V. et al. A Regression Analysis of the Carbon Footprint of Megacities. *Sustainability*, 2021, vol. 13, iss. 3. DOI: 10.3390/su13031379

15. Rongxin Wu, Zhizhou Tan, Boqiang Lin. Does carbon emission trading scheme really improve the CO₂ emission efficiency? Evidence from China's iron and steel industry. *Energy*, 2023, vol. 277, no. 127743. DOI: 10.1016/j.energy.2023.127743
16. Flues F., Rübhelke D., Vögele S. An analysis of the economic determinants of energy efficiency in the European iron and steel industry. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 104, pp. 250–263. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.030
17. Tan Haixia, Wang Hongtu, Chen Lin, Shi Feng. Dummy Variable Model Analysis with Law Factors on Safety Production in Chinese Coal Mine Industry. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 26, pp. 2383–2390. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2449
18. Alsaleh M., Abdul-Rahim S.A. Cost Efficiency of Bioenergy Industry and its Economic Determinants in EU-28: A Tobit Model Based on DEA Efficiency Scores. *International Journal of Management and Sustainability*, 2019, vol. 8, iss. 2, pp. 79–87. DOI: 10.18488/journal.11.2019.82.79.87
19. Kenett R., Zacks S., Gedeck P. *Modern Statistics: A Computer-Based Approach with Python*. Cham, Springer International Publishing AG, 2022. DOI: 10.1007/978-3-031-07566-7
20. Xiaolei Wang, Renxin Deng, Yufang Yang. The spatiotemporal effect of factor price distortion on capacity utilization in China's iron and steel industry. *Resources Policy*, 2023, vol. 86, part A, no. 104151. DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.104151

Информация о конфликте интересов

Я, автор данной статьи, со всей ответственностью заявляю о частичном и полном отсутствии фактического или потенциального конфликта интересов с какой бы то ни было третьей стороной, который может возникнуть вследствие публикации данной статьи. Настоящее заявление относится к проведению научной работы, сбору и обработке данных, написанию и подготовке статьи, принятию решения о публикации рукописи.

APPLICATION OF COVARIANCE ANALYSIS AND ADAPTIVE FORECASTING METHODS TO EVALUATE CIRCULAR ECONOMY STRATEGIES OF METALLURGICAL CORPORATIONS

DOI: <https://doi.org/10.24891/dzcmsz>

EDN: <https://elibrary.ru/dzcmsz>

Aleksandr A. SHAPUROV

Melitopol State University (MelSU), Melitopol, Zaporozhye Oblast, Russian Federation

e-mail: shapurov.alexandr@gmail.com

ORCID: not available

Article history:

Article No. 1/2026

Received 12 Jan 2026

Accepted 16 Feb 2026

Available online

30 Mar 2026

JEL Classification:

C12, C53, L61, Q53

Keywords: circular economy, metallurgical industry, econometric modeling, adaptive forecasting, life cycle assessment

Abstract

Subject. The processes of transformation of management models of metallurgical enterprises in the context of global climate regulation and digitalization.

Objectives. Development and testing of integrated information and analytical tools for assessing the impact of circular economy strategies on the financial and environmental performance of corporations.

Methods. The research is based on a complementary approach synthesizing methods of mathematical statistics and system analysis. Covariance analysis using fictitious variables is applied to quantify the impact of technological factors on profitability. The adaptive Brown double exponential smoothing model was used to predict the dynamics of production indicators and a life cycle assessment model in a specialized software environment for verifying environmental risks.

Results. It has been established that the complete processing of by-products of metallurgical conversion is a statistically significant driver of net profit growth. A steady trend of increasing production volumes has been identified, which, under an inertial scenario, leads to a critical increase in ecotoxicity. The potential of the secondary raw materials market has been calculated and a strategic development matrix has been formed, allowing management to determine the optimal trajectories of technological modernization.

Conclusions. The integration of mathematical modeling and environmental assessment makes it possible to justify the economic feasibility of moving from a linear model to a closed cycle, transforming man-made waste from liabilities into liquid assets and ensuring the financial stability of the business.

© Publishing house FINANCE and CREDIT, 2026

Please cite this article as: Shapurov A.A. Application of covariance analysis and adaptive forecasting methods to evaluate circular economy strategies of metallurgical corporations. *Economic Analysis: Theory and Practice*, 2026, iss. 3, pp. 39–56. DOI: 10.24891/dzcmsz EDN: DZCMSZ

Acknowledgments

I am profoundly grateful to Andrei V. NAIDYSH, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Applied Mathematics and Information Technologies named after Professor V.M. Naidysh of the Melitopol State University, for his advice and valuable comments while working on this article.

References

1. Mendez-Alva F., Cervo H., Krese G., Van Eetvelde G. Industrial symbiosis profiles in energy-intensive industries: Sectoral insights from open databases. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 314, no. 128031. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128031
2. Silvestre B.S., Țîrcă D.M. Innovations for sustainable development: Moving toward a sustainable future. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 208, pp. 325–332. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.244
3. Hidayatno A., Destyanto A.R., Hulu C.A. Industry 4.0 Technology Implementation Impact to Industrial Sustainable Energy in Indonesia: A Model Conceptualization. *Energy Procedia*, 2019, vol. 156, pp. 227–233. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.11.133
4. Schroeder P., Anggraeni K., Weber U. The relevance of circular economy practices to the sustainable development goals. *Journal of Industrial Ecology*, 2018, vol. 23, iss. 1, pp. 77–95. DOI: 10.1111/jiec.12732
5. Ormazabal M., Prieto-Sandoval V., Puga-Leal R., Jaca C. Circular economy in Spanish SMEs: challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 185, pp. 157–167. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.031
6. Shu-hua Ma, Zong-guo Wen, Ji-ning Chen, Zhi-chao Wen. Mode of circular economy in China's iron and steel industry: a case study in Wu'an city. *Journal of Cleaner Production*, 2014, vol. 64, pp. 505–512. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.10.008
7. Fox M.A. Metallurgical By-Products. In: Glossary for the Worldwide Transportation of Dangerous Goods and Hazardous Materials. Berlin, Heidelberg, Springer, 1999, pp. 147–150. DOI: 10.1007/978-3-662-11890-0_48
8. Belodedenko V., Hanush O., Hrechanyi O. Fatigue lifetime model under a complex loading with application of the amalgamating safety indices rule. *Procedia Structural Integrity*, 2022, vol. 36, pp. 182–189. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.01.022
9. Antrekowitsch J., Hanke G. Efficient Steel Mill Dust Recycling – Aiming for Zero Waste. In: The Minerals, Metals & Materials Series. Cham, Springer International Publishing, 2022, pp. 303–310. DOI: 10.1007/978-3-030-92563-5_32
10. Di Maria A., Merchán M., Marchand M. et al. Evaluating energy and resource efficiency for recovery of metallurgical residues using environmental and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2022, no. 131790. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131790
11. Smyl S. A hybrid method of exponential smoothing and recurrent neural networks for time series forecasting. *International Journal of Forecasting*, 2020, vol. 36, iss. 1, pp. 75–85. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2019.03.017
12. Min Liu, Taylor J.W., Wei-Chong Choo. Further empirical evidence on the forecasting of volatility with smooth transition exponential smoothing. *Economic Modelling*, 2020, vol. 93, pp. 651–659. DOI: 10.1016/j.econmod.2020.02.021
13. Rendon-Sanchez J.F., de Menezes L.M. Structural combination of seasonal exponential smoothing forecasts applied to load forecasting. *European Journal of Operational Research*, 2019, vol. 275, iss. 3, pp. 916–924. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.12.013

14. Paravantis J.A., Tasios P.D., Dourmas V. et al. A Regression Analysis of the Carbon Footprint of Megacities. *Sustainability*, 2021, vol. 13, iss. 3. DOI: 10.3390/su13031379
15. Rongxin Wu, Zhizhou Tan, Boqiang Lin. Does carbon emission trading scheme really improve the CO₂ emission efficiency? Evidence from China's iron and steel industry. *Energy*, 2023, vol. 277, no. 127743. DOI: 10.1016/j.energy.2023.127743
16. Flues F., Rübhelke D., Vögele S. An analysis of the economic determinants of energy efficiency in the European iron and steel industry. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 104, pp. 250–263. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.030
17. Tan Haixia, Wang Hongtu, Chen Lin, Shi Feng. Dummy Variable Model Analysis with Law Factors on Safety Production in Chinese Coal Mine Industry. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 26, pp. 2383–2390. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2449
18. Alsaleh M., Abdul-Rahim S.A. Cost Efficiency of Bioenergy Industry and its Economic Determinants in EU-28: A Tobit Model Based on DEA Efficiency Scores. *International Journal of Management and Sustainability*, 2019, vol. 8, iss. 2, pp. 79–87. DOI: 10.18488/journal.11.2019.82.79.87
19. Kenett R., Zacks S., Gedeck P. *Modern Statistics: A Computer-Based Approach with Python*. Cham, Springer International Publishing AG, 2022. DOI: 10.1007/978-3-031-07566-7
20. Xiaolei Wang, Renxin Deng, Yufang Yang. The spatiotemporal effect of factor price distortion on capacity utilization in China's iron and steel industry. *Resources Policy*, 2023, vol. 86, part A, no. 104151. DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.104151

Conflict-of-interest notification

I, the author of this article, bindingly and explicitly declare of the partial and total lack of actual or potential conflict of interest with any other third party whatsoever, which may arise as a result of the publication of this article. This statement relates to the study, data collection and interpretation, writing and preparation of the article, and the decision to submit the manuscript for publication.